第48卷 第3期
2025年3月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 48 No. 3
Mar. 2025

基于电路理论的生态安全格局时空演变与影响因素研究
——以陕北黄土高原为例

张 杰[1,2]， 屈建军[1,2]， 陈 海[1,2]， 石金鑫[1,2]， 马羽赫[1,2]， 刘 迪[3]

（1. 西北大学城市与环境学院，陕西 西安 710127；2. 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室，陕西 西安 710127；3. 河南师范大学旅游学院，河南 新乡 453007）

摘 要：识别对于维护区域生态系统具有重要意义的点、线、面等景观要素，构建动态生态安全格局并探究其影响因素，对于维护区域生态安全具有重要意义。针对以往研究对生态安全格局动态演化和影响因素探究的不足，利用形态空间格局分析（MSPA）、景观连通性分析和电路理论模型等方法，构建2000—2020年陕北黄土高原的生态安全格局，分析其时空演化特征，并利用地理探测器、普通最小二乘法（OLS）和地理加权回归（GWR）模型探究生态安全格局空间异质性的影响因素，并给出生态恢复策略。结果表明：（1）2000—2020年生态源地在陕北黄土高原南部集中分布，面积变化较小且空间位置较为稳定。（2）2000、2010年和2020年陕北黄土高原生态阻力面的均值分别为4.96、4.36和4.40，呈现南部低、西北高的空间格局。（3）2000、2010年和2020年陕北黄土高原生态廊道的长度分别为2416.25 km、3433.61 km和2643.62 km，南部生态廊道密集，以低阻力生态廊道为主，北部生态廊道稀疏，以高阻力生态廊道为主。（4）生态夹点和生态障碍点主要分布在陕北黄土高原西北部，面积不断减少。（5）植被覆盖度、景观多样性、人口密度、坡度和降水是影响陕北黄土高原生态安全格局空间异质性的主要因子。研究结果可为陕北黄土高原未来的生态规划提供科学合理的参考和依据，同时有助于生态政策的制定与调整。

关 键 词：生态安全格局；时空演化；影响因素；电路理论；陕北黄土高原

文章编号：1000－6060(2025)03－0494－12(0494～0505)

自工业革命以来，工业化和城镇化的迅猛发展极大地促进了社会经济的繁荣，但快速的城市扩张和工业化进程对生态系统的干扰也日益加剧，例如，不合理的土地利用方式和高强度的人类活动导致了景观破碎化和连通性下降，并在一定程度上导致生态系统结构和功能发生变化[1]，严重影响了区域生态安全与可持续发展[2]。生态安全格局作为一种底线式的生态系统管理方式，为区域生态安全问题提供了空间解决方案[3]，对于维护区域的生态安全具有重要意义[4]。

生态安全格局是指由生态源地和生态廊道等景观要素所组成的对区域生态安全具有重要作用的点、线、面的空间格局[5]。早期的生态安全格局研究以自然生态系统为主[6]，主要围绕生物多样性保护、建立保护地体系和识别优先保护区域等[7]；随着人类活动对生态系统的干扰日益加剧，生态安全格局研究逐步转向以自然生态系统为主，与社会经济耦合的相互协同格局的发展趋势[7]。目前，生态安全格局已基本形成“识别生态源地-构建阻力面-提取生态廊道”的研究范式[8]；其中，生态源地是构建生态安全格局的基础[9]，已有研究主要利用直接识别法[10]、形态空间格局分析（MSPA）[11]和景观连通性分析[12]等方法识别生态源地；生态阻力面反映了物种、能量在不同的景观间迁移、交换的困难程度，

收稿日期：2024-03-26； **修订日期：**2024-05-13
基金项目：国家自然科学基金资助项目(42171256)资助
作者简介：张杰(1996-)，男，博士研究生，主要从事生态系统服务与生态安全格局研究. E-mail: 202021009@stumail.nwu.edu.cn
通讯作者：陈海(1971-)，男，博士，教授，主要从事生态系统服务与人类福祉等方面的研究. E-mail: chw@nwu.edu.cn

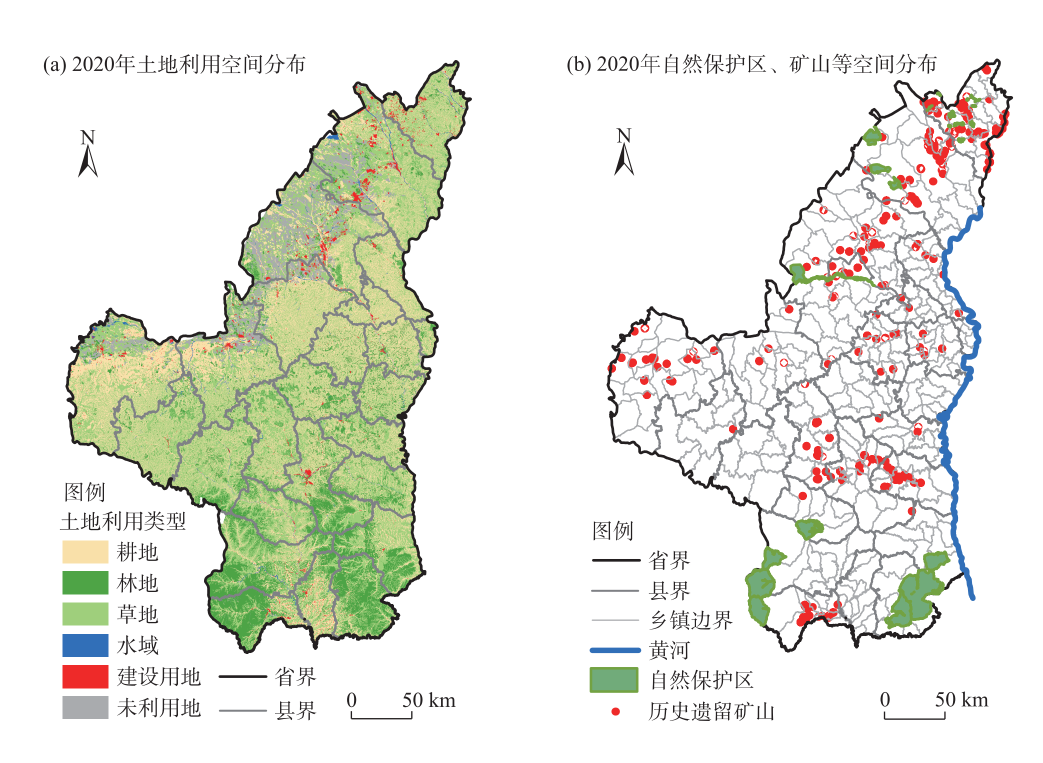
已有研究主要通过构建指标体系或选择多因子进行赋值的方法构建阻力面[13]和利用夜间灯光数据[14]、不透水面[3]等进行修正阻力面；生态廊道是生态源地之间能量流通的重要桥梁和纽带，最小累积阻力(MCR)模型[15]、重力模型[16]和电路理论模型[17]是识别生态廊道常见的方法。随着研究的深入，相关研究还基于生态系统服务价值[18]、生态风险评价[19]和生态系统服务供需[20]等视角构建与优化生态安全格局，以及模拟未来的生态安全格局[21]，并在生态安全格局构建的基础上识别生态修复的优先区域[22]。以往研究对于生态保护具有重要意义，但缺乏对生态安全格局动态演化的深入研究[23]，难以全面地反映区域的生态本底特征[24]；同时，不同时期的生态安全格局会因自然条件、人类活动强度和政府实施的生态政策而发生变化[25]，在政府生态保护财政支出有限的背景下[22]，明晰生态安全格局的影响因素对于国家和地方政府因地制宜地制定和调整相关生态政策至关重要[26]，但目前这方面的研究较为罕见。

陕北黄土高原是典型的生态脆弱区，石油、煤炭等自然资源丰富，滑坡、泥石流等自然灾害频繁发生，不同时期城镇化、工业化等人类活动对生态系统的干扰程度存在差异；同时，1999年中国政府开始在陕北黄土高原实施了一系列生态保护和生态修复措施，如退耕还林草政策，这也在很大程度上改变了原有的景观格局[27]，因此，迫切需要对生态安全格局进行动态分析与影响因素研究。基于此，本文利用MSPA、景观连通性分析和电路理论模型等方法构建2000—2020年陕北黄土高原的生态安全格局，分析其时空演化特征；在此基础上，利用地理探测器模型、普通最小二乘法(OLS)、地理加权回归(GWR)模型等方法探讨生态安全格局的影响因素，以期为制定生态保护和修复策略提供科学依据。

1　数据与方法

1.1　研究区概况

陕北黄土高原(35°02′~39°35′N，107°15′~111°15′E)位于中国黄土高原中部，陕西省北部，总面积79981.9 km²；基本地貌类型为黄土塬、梁、峁和沟等，地势西北高、东南低；属于温带大陆性季风气候，年降水量350~600 mm，降水集中于夏季且多以暴雨为主，滑坡、泥石流等自然灾害频繁发生，属于典型的生态脆弱区(图1)。1999年以来，政府在该区域实施了退耕还林草工程，2000—2020年陕北黄土高原的土地利用结构发生了重大转变，主要表现为耕地面积减少，林地和草地面积增加，生态环境



注：受原始土地利用栅格数据空间范围的限制，研究区边缘出现小范围数据缺失，对研究结论无影响。下同。

图1　研究区概况

Fig. 1　Overview of the study area

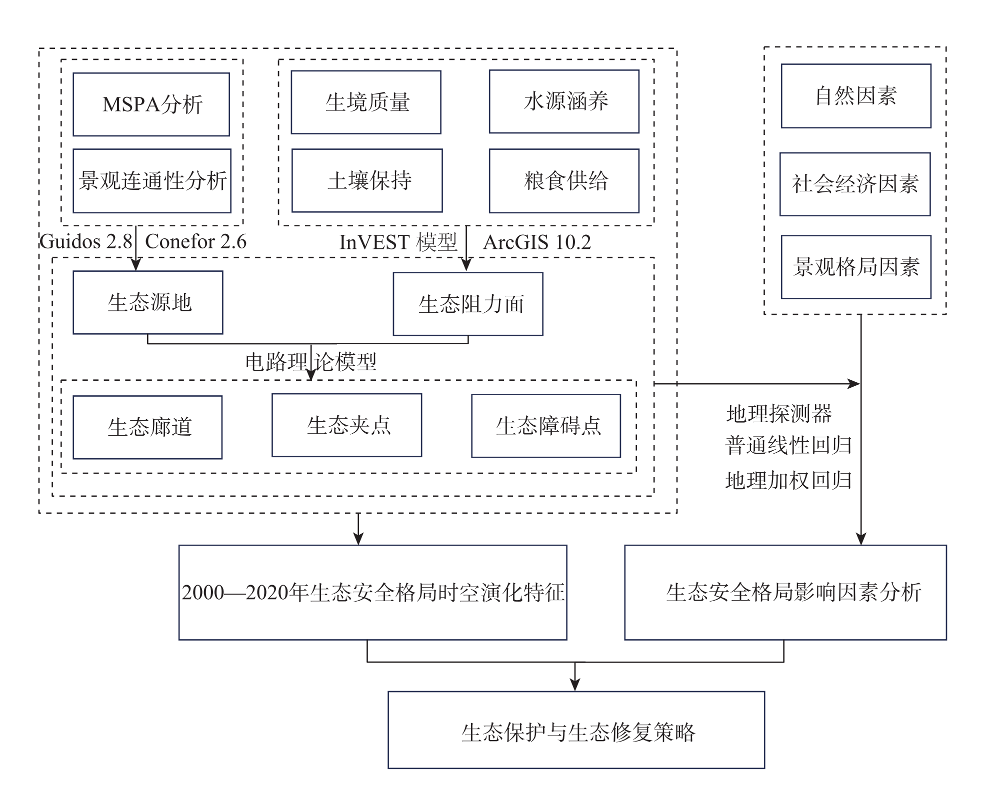
得到明显改善;同时,陕北黄土高原景观格局的变化和不同时期人类活动强度的差异势必会导致生态安全格局的变化,这为本文研究2000—2020年陕北黄土高原生态安全格局的动态变化和影响因素提供了较好的研究平台。

1.2 数据来源

研究数据主要包括:(1) 2000、2010年和2020年的土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn),分辨率为30 m;(2) 数字高程模型(DEM)数据来源于美国国家航天航空局网站(https://www.nasa.gov/),分辨率为30 m;(3) 2000、2010年和2020年的降水量数据、气温数据和蒸散发数据均来源于国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn),分辨率为1 km;(4) 土壤数据来源于世界土壤数据库(HWSD);(5) 2000、2010年和2020年的归一化植被指数(NDVI)数据来源于资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn/),分辨率为30 m;(6) 2000、2010年和2020年的粮食产量数据来源于《延安市统计年鉴》和《榆林市统计年鉴》;(7) 2000、2010年和2020年的人口密度数据来源于全LandScan全球人口数据集;(8) 2000、2010年和2020年的国内生产总值(GDP)数据来源于Zhao等[28]的研究成果,分辨率为1 km;(9) 2000、2010年和2020年的夜间灯光数据来源于哈佛大学数据库,分辨率为1 km;(10) 自然保护区数据来源于中国自然保护区标本资源共享平台(http://bhq.papc.cn);(11) 矿山位置数据来源于陕西省环境科学研究院。利用ArcGIS 10.2软件对上数据进行预处理,将所有栅格数据重新采样,空间分辨率统一为1 km,均采用Albers投影。

1.3 研究方法

本文的研究框架如图2所示。首先,综合考虑景观斑块的完整性和连通性,利用MSPA和景观连通性分析方法识别生态源地;其次,利用InVEST模型评估了生境质量、水源涵养、土壤保持和粮食供给4种生态系统服务,在此基础上,较为客观地构建生态阻力面;然后,根据生物随机游走的特性,利用电路理论模型识别生态廊道、生态夹点和生态障碍点等景观要素,构建2000—2020年陕北黄土高原的生态安全格局;最后,利用地理探测器模型、OLS和GWR模型探究生态安全格局空间异质性的影响因素,并给出生态保护和恢复策略,为陕北黄土高原



注:MSPA为形态空间格局分析;Guidos 2.8用于划分景观类型;Conefor 2.6用于计算景观连通性;InVEST模型用于计算生态系统服务。

图2 研究框架

Fig. 2 Research framework

国土空间生态保护和修复提供理论参考。

1.3.1 MSPA分析与景观连通性分析 本文利用MSPA和景观连通性分析方法识别生态源地。首先，利用Gudios Toolbox软件将景观划分为核心区、孤岛、连接桥、环岛、支线、边缘区、孔隙7种类型，并提取面积大于10 km²的核心区斑块作为备选生态源地[4,29]，然后将连通性较高的核心斑块作为生态源地。连接概率（PC）被广泛用于评价景观连接度，其计算公式如下：

$$PC=\frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}a_i\times a_j\times P_{ij}^*}{A_L^2} \tag{1}$$

$$dPC=\frac{PC-PC_{remove}}{PC}\times 100 \tag{2}$$

式中：PC为生态斑块的可能连通性指数，PC值越大，区域景观连通性越高；a_i、a_j分别为斑块i和j的面积（km²）；n为斑块数量（个）；A_L为景观总面积（km²）；P_{ij}^*为物种在斑块i和j中扩散的最大可能性；dPC为斑块重要性指数，表示现有斑块对于维持景观连通性的重要性；PC_{remove}为移除某一生态斑块后的可能连通性指数。

1.3.2 生态阻力面的构建 生态系统服务作为人类赖以生存的自然环境与效用，是连接生态系统和社会经济系统的桥梁，反映了人类活动干扰下的生态环境状况[30]，可以很好地反映生态源地扩张过程中遇到的阻力，因此，本文在参考相关文献的基础上[31-32]，基于生态系统服务评估来构建阻力面。

基于陕北黄土高原水资源短缺、水土流失严重、生态环境脆弱等实际情况，选取了生境质量、水源涵养、土壤保持和粮食供给4种生态系统服务[27,33]，将4种生态系统服务等权叠加并取倒数，以取倒数后的生态系统服务加权结果作为生态阻力面[31-32]，生态系统服务越高的区域，其阻力值越小[3]。4种生态系统服务的具体计算过程可以参考石金鑫等[27]的研究成果。

1.3.3 电路理论模型 本文使用Pinchpoint Mapper工具提取生态夹点，将电流密度较高的区域确定为生态夹点区域[34-35]；利用Barrier Mapper工具识别生态障碍点，将累积电流恢复高值区作为生态障碍点区域[36-37]。

1.3.4 地理探测器 地理探测器模型是由王劲峰等[38]提出的一个空间统计模型，是探测空间分异性，以及揭示其背后驱动力的一种统计学方法，其解释力的大小以q值来衡量。计算公式如下：

$$q=1-\frac{\sum_{h=1}^{L}N_h\sigma_h^2}{N\sigma^2} \tag{3}$$

式中：N_h和N分别为层h和整个研究区的样本单元数；h为变量Y或者因子X的分区，$h=1, 2, \cdots, L$；L为分区的数量；σ_h^2和σ^2分别为层h和整个研究区的离散方差；q为探测因子的探测值，$q\in[0, 1]$，q值越大，表示自变量x对因变量y的解释力越强，反之则越弱。

1.3.5 普通最小二乘法（OLS） OLS是用来解释因变量（y_m）与自变量（x_m）之间关系的一种统计学方法。计算公式如下：

$$y_m=\beta_0+\sum_k\beta_k x_{mk}+\varepsilon_m \tag{4}$$

式中：y_m为第m个乡镇的因变量值；β_0为模型截距；x_{mk}为第k个自变量在第m个乡镇的值；k为自变量记数；β_k为第k个自变量的回归系数；ε_m为乡镇m的随机误差项。

1.3.6 地理加权回归（GWR）模型 GWR模型是OLS的扩展，能够反映参数在不同空间的非平稳性，使变量间的关系可以随空间位置的变化而变化[39]。GWR模型的计算公式如下：

$$y_i=\beta_0(u_i,v_i)+\sum_{j=1}^{k}\beta_j(u_i,v_i)x_{ij}+\varepsilon_i \tag{5}$$

式中：y_i为位置i处因变量的值；(u_i,v_i)为位置i处的地理坐标；$\beta_0(u_i,v_i)$为位置i处的截距；$\beta_j(u_i,v_i)$为自变量x_{ij}在位置i处的回归系数；k为解释变量的个数；x_{ij}为位置i处的第j个自变量值；ε_i为随机误差项。

2 结果与分析

2.1 生态安全格局的时空演化

2.1.1 生态源地的时空演化 2000、2010年和2020年陕北黄土高原生态源地的面积分别为5566.65 km²、5521.81 km²、5813.71 km²，生态源地的面积先减少后增加，但总体变化较小。生态源地均呈现南密北疏的空间格局（图3），且空间位置较为稳定，在南部集中分布，主要原因是这些区域属于自然保护区（图1），生境质量较好；东部和北部的生态源地土地利用类型

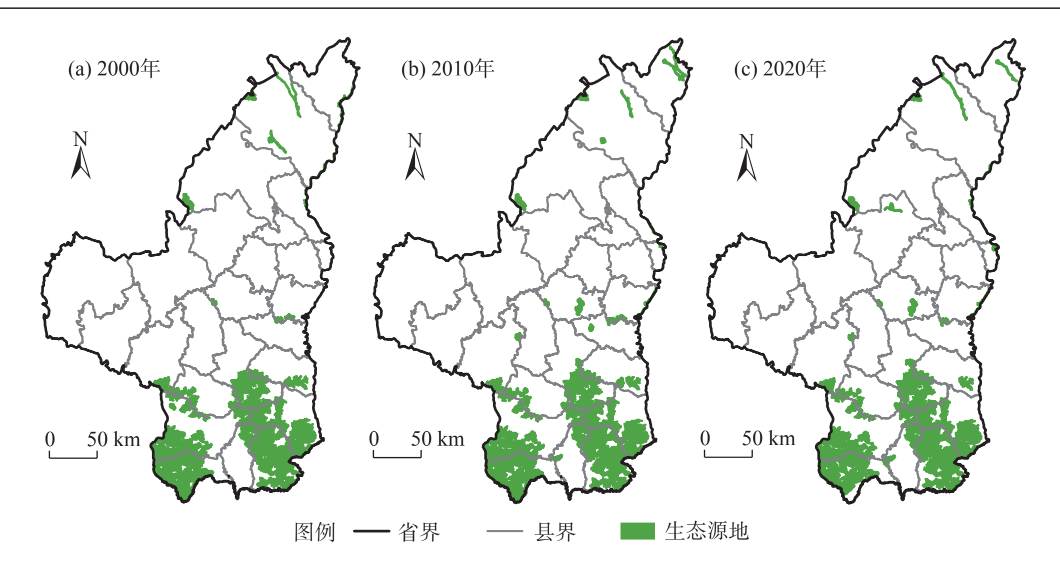


图3 2000—2020年陕北黄土高原生态源地空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of ecological sources of Loess Plateau in northern Shaanxi from 2000 to 2020

为水域;而西部主要土地利用类型是耕地、未利用地和草地,生境质量较差,无生态源地分布。

2.1.2 生态阻力面的时空演化 2000、2010年和2020年陕北黄土高原生态阻力面的均值分别为4.96、4.36和4.40,说明2000—2020年陕北黄土高原的生态环境得到改善;阻力面的空间分异明显,3个时期生态阻力值均呈现南部低、西北高的空间格局,主要原因是南部的土地利用类型以林地为主,生境质量较好,而西北部的煤炭、石油等资源丰富,人类干扰剧烈(图4)。

2.1.3 生态廊道的时空演化 2000、2010年和2020年陕北黄土高原生态廊道的数量分别为49条、67条和38条,长度分别为2416.25 km、3433.61 km和2643.62 km,生态廊道的数量和长度呈先增加后减少的趋势;空间分布均呈现南密北疏、东密西疏的空间格局,陕北黄土高原南部生态廊道密集,以低阻力生态廊道为主,北部生态廊道稀疏,以高阻力生态廊道为主(图5)。

2.1.4 生态夹点和生态障碍点的时空演化 2000、2010年和2020年生态夹点和生态障碍点主要分布在陕北黄土高原西北部,这与西北部的土地利用类型主要为未利用地、草地和耕地,生态本底脆弱,以及这些区域煤炭资源丰富,工业发达,受人类干扰剧烈等有关(图6)。2000—2020年生态夹点和生态

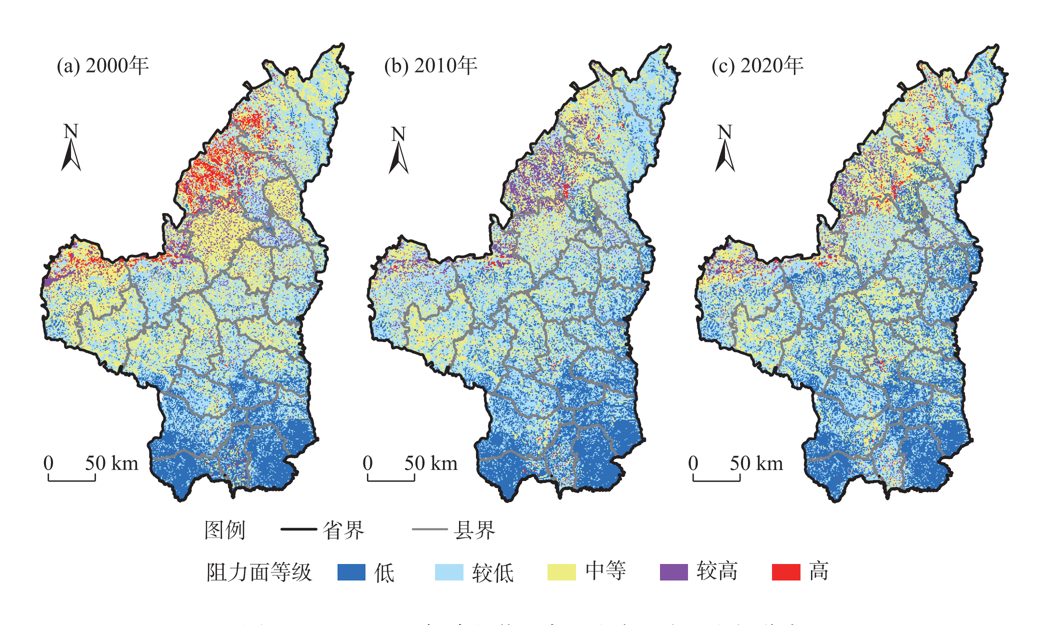


图4 2000—2020年陕北黄土高原生态阻力面空间分布

Fig. 4 Spatial distributions of ecological resistance surface of Loess Plateau in northern Shaanxi from 2000 to 2020

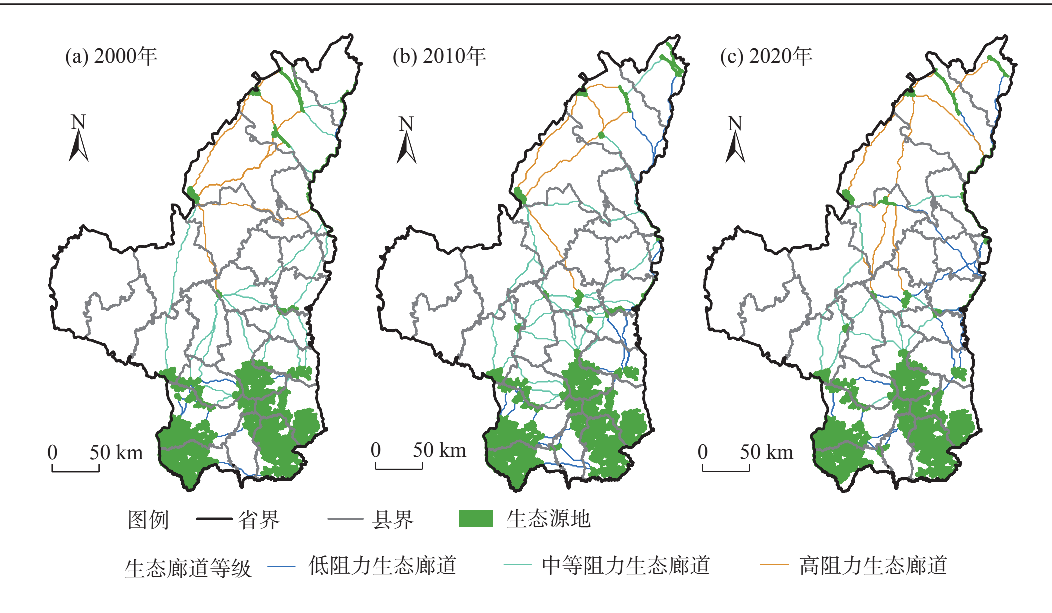


图5　2000—2020年陕北黄土高原生态廊道空间分布

Fig. 5　Spatial distributions of ecological corridors of Loess Plateau in northern Shaanxi from 2000 to 2020

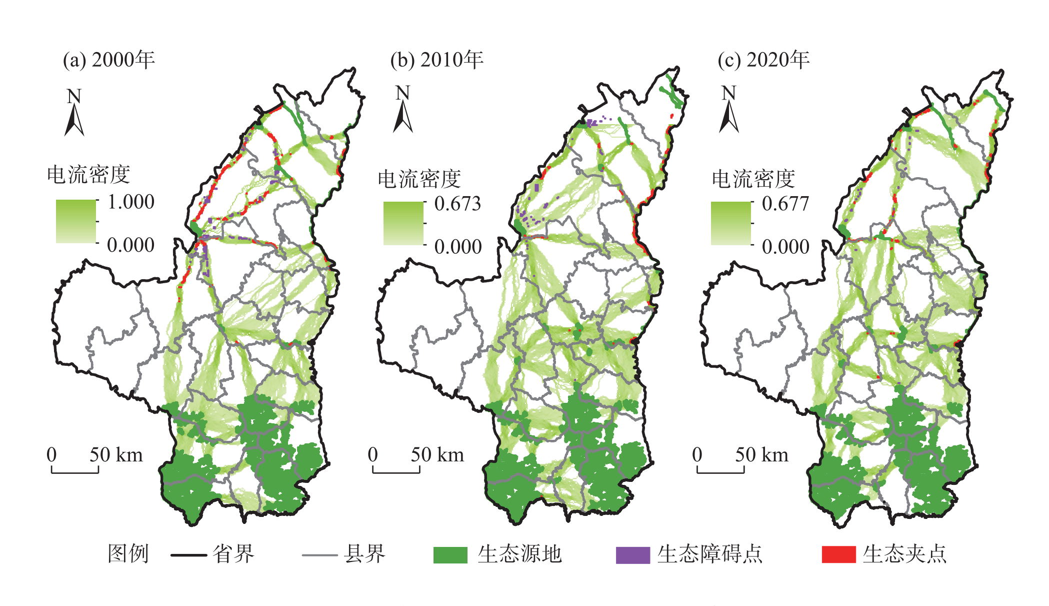


图6　2000—2020年陕北黄土高原生态夹点和生态障碍点空间分布

Fig. 6　Spatial distributions of ecological pinch points and ecological barriers of Loess Plateau in northern Shaanxi from 2000 to 2020

障碍点面积均呈现减少的趋势(表1),说明陕北黄土高原的景观连通性增强,有利于生物迁徙和能量流动。

2.2　生态安全格局影响因素分析

生态源地和生态阻力面均是生态安全格局的核心要素[40]。其中,生态源地是生态安全格局构建的基础;生态阻力面是对现实环境中物种迁徙难易程度的模拟,它直接影响生态廊道、生态夹点和生

表1　2000—2020年陕北黄土高原生态夹点与生态障碍点的数量与面积

Tab. 1　Number and area of ecological pinch points and ecological barriers from 2000 to 2020

年份	生态夹点		生态障碍点	
	数量/个	面积/km^2	数量/个	面积/km^2
2000	83	395.23	70	281.91
2010	44	250.22	42	132.71
2020	56	207.12	19	33.89

态障碍点的空间分布[41]。因此，本文对生态安全格局空间异质性的影响因素的分析是围绕生态源地和生态阻力面的空间异质性展开。

2.2.1 影响因子的选取 生态源地和生态阻力面受到多种因素的影响[29]，具体可以概括为自然因素、社会经济因素和景观格局因素三大类[5,22,29,42]。本文在参考相关研究成果的基础上[41-43]，结合陕北黄土高原地形地貌复杂、水土流失严重、植被覆盖率较低和不同时期人类活动强度存在差异等实际情况，初步选取了11个影响因子，分别是：高程、坡度、归一化植被指数（NDVI）、降水、气温、人口密度、国内生产总值（GDP）、夜间灯光强度、香农多样性指数（SHDI）、香农均匀度指数（SHEI）和蔓延度指数（CONTAG）。

2.2.2 生态源地的影响因素 方差膨胀因子检验显示SHDI、CONTAG和降水的方差膨胀因子（VIF）值均大于10，因此将这3个因子剔除。地理探测器因子探测结果显示，坡度和夜间灯光强度这2个指标没有通过显著性检验，故剔除了这2个因子。剩余的6个因子的P值都通过了0.000的显著性检验，且q值均大于0.1，说明它们具有较强的解释作用。OLS回归结果如表2所示，只有NDVI和SHEI这2个因子通过显著性检验，其中，NDVI与生态源地呈正相关，这表明NDVI越高，越有利于生态源地的形成；空间自相关检验发现，生态源地不存在空间相关性，因此，本文仅利用OLS分析生态源地的影响因素。

2.2.3 生态阻力面的影响因素 方差膨胀因子检验显示SHDI、GDP和夜间灯光的VIF值均大于10，因此将这3个影响因子剔除；地理探测器结果表明：高程、气温、SHEI和CONTAG的q值小于0.1，说明这4个因子的影响作用较小；坡度、降水、NDVI、和人口密度的q值均大于0.1，说明它们具有较强的解释作用。

OLS结果如表3所示，坡度、降水、NDVI、和人口密度均通过了显著性检验，说明它们是影响陕北黄土高原生态阻力面的主要因素。利用ArcGIS的空间自相关工具分析阻力面的空间关系，Moran's I值为0.533，说明阻力面存在明显的空间集聚性。此外，本文比较了OLS与GWR模型测算的参数[44]，发现GWR模型的拟合效果更好（表4）。GWR模型的拟合结果如图7所示，坡度、降水和NDVI均与阻力值呈负相关关系，人口密度与阻力值呈正相关关系。通过比较影响因子的相关系数，发现人口密度对生态阻力值的影响作用最强，且人口密度越高，生态阻力值越大，空间上表现为自南向北递减的特征，主要原因是：陕北黄土高原南部为自然保护区，受到较为严格的保护，对外部干扰和内在变化表现出极为脆弱的响应。

2.3 生态恢复策略

在政府生态保护资金有限的背景下，根据生态安全格局的构建结果，并结合其影响因素和陕北黄土高原的实际情况，因地制宜地制定生态恢复策略具有重要意义。本文的生态修复策略如下：

（1）陕北黄土高原生态源地呈现南密北疏的空

表2 生态源地影响因子OLS测算结果

Tab. 2 Results of OLS of ecological source influencing factors

变量	系数	标准误	P值	VIF
高程	0.064	0.153	0.675	4.22
气温	−1.159	0.121	0.194	4.03
NDVI	0.263	0.082	0.005	2.28
夜间灯光强度	−0.295	0.207	0.157	1.53
人口密度	0.395	1.627	0.809	1.58
SHEI	−0.298	0.060	0.000	1.43

注：NDVI为归一化植被指数；SHEI为香农均匀度指数；VIF为方差膨胀因子。下同。

表3 生态阻力面影响因子OLS测算结果

Tab. 3 Results of OLS of ecological resistance surface influencing factors

变量	系数	标准误	P值	VIF
坡度	−0.289	0.018	0.000	1.46
降水	−0.117	0.014	0.000	2.37
NDVI	−0.032	0.015	0.040	2.47
人口密度	0.900	0.326	0.000	1.10

表4 OLS与GWR模型结果对比

Tab. 4 Comparison between OLS and GWR model results

模型	AICc	R^2	R^2 adjusted
GWR	−1154.333	0.869	0.863
OLS	−1113.966	0.843	0.841

注：GWR为地理加权回归模型；OLS为普通最小二乘法；AICc为赤池信息量准则；R^2为拟合优度；R^2 adjusted为调整后的拟合优度。

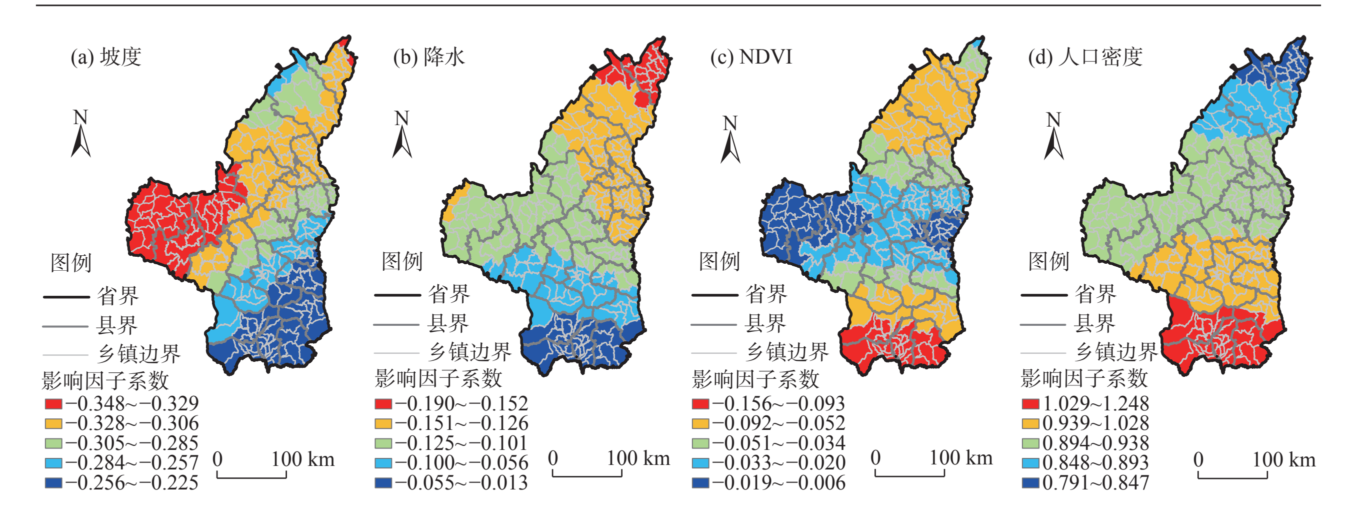


图7　生态阻力面影响因子的空间异质性

Fig. 7　Spatial heterogeneity of influencing factors of ecological resistance surface

间格局，空间分布主要受NDVI的影响，因此，未来应在陕北黄土高原南部继续实施严格的生态保护政策，严格限制人类活动对生态源地的干扰；在陕北黄土高原中部和北部继续实施封山育林、退耕还林还草等生态修复工程，加强天然林保护，进一步改善生态环境。

（2）人口密度对阻力面的影响作用最强，因此，未来应平衡好经济发展与生态环境保护的关系，尽可能地减少人类活动对生态系统的干扰；如陕北黄土高原北部煤炭、石油等资源丰富，地方政府未来应逐步完成历史遗留矿山的综合治理，积极推进清洁生产、避免无序开采，逐渐恢复该区域的生态功能。

（3）由于陕北黄土高原生态廊道多为南北走向，生态廊道冗长，极易出现断裂，因此未来应在陕北黄土高原中部和北部新增一些生态源地，为生物迁徙提供休憩的场地，这也有利于提升陕北黄土高原的整体连通性。

3　讨论

已有研究多基于静态视角，构建单一年份的生态安全格局，忽略了生态系统要素复杂、动态连续变化等特征[43]。与以往相关研究相比，本文的创新之处在于：（1）利用电路理论模型，构建了2000—2020年陕北黄土高原的动态生态安全格局，并分析其时空演化特征；（2）利用地理探测器、OLS和GWR模型识别生态安全格局的主要影响因子，并给出生态修复策略，有利于为相关生态政策的制定与调整提供理论支撑。具体而言，本文综合考虑了景观结构的完整性和连通性，利用MSPA和景观连通性相结合识别生态源地，发现2000、2010年和2020年生态源地的面积分别为5566.65 km^2、5521.81 km^2、5813.71 km^2，且空间位置相对稳定，这与已有研究结果基本一致[45]。同时，本文基于生态系统服务评估结果构建生态阻力面，在一定程度上避免了主观打分法的缺陷，客观性更强[32]。此外，与MCR模型相比，本文利用电路理论模型提取生态廊道，可以更好地模拟生物的真实迁徙路线[46]，结果表明：2000—2020年陕北黄土高原生态廊道均呈现南密北疏、东密西疏的空间格局，生态夹点和生态障碍点的面积均呈减少趋势，说明2000—2020年陕北黄土高原的生态环境得到了一定的改善，且本文研究结果与《陕西省国土空间规划（2021—2035）》和相关研究结果基本一致[45,47]。

4　结论

（1）2000、2010年和2020年陕北黄土高原生态源地的面积分别为5566.65 km^2、5521.81 km^2、5813.71 km^2，生态源地的面积变化较小，空间分布呈现南密北疏的空间格局，且空间位置相对稳定。

（2）2000、2010年和2020年陕北黄土高原生态阻力面的均值分别为4.96、4.36和4.40，空间分布呈南部低、西北高的空间格局。

（3）2000—2020年生态廊道的数量和长度均呈

先增加后减少的趋势,陕北黄土高原南部生态廊道密集,以低阻力生态廊道为主,北部生态廊道稀疏,以高阻力生态廊道为主。

（4）2000—2020年陕北黄土高原生态夹点和生态障碍点主要分布在西北部,面积均呈现减少的趋势。

（5）植被覆盖度、景观多样性、人口密度、坡度和降水是陕北黄土高原生态安全格局的主要影响因子。

参考文献(References)

[1] Guo M, Cong X, Zheng H, et al. Integrating the ordered weighted averaging method to establish an ecological security pattern for the Jianghuai ecological economic zone in China: Synergistic intraregional development[J]. Ecological Indicators, 2022, 135: 108543, doi: 10.1016/j.ecolind.2022.108543.

[2] Chen J, Wang S S, Zou Y T. Construction of an ecological security pattern based on ecosystem sensitivity and the importance of ecological services: A case study of the Guanzhong Plain urban agglomeration, China[J]. Ecological Indicators, 2022, 136: 108688, doi: 10.1016/j.ecolind.2022.108688.

[3] Peng J, Yang Y, Liu Y X, et al. Linking ecosystem services and circuit theory to identify ecological security patterns[J]. Science of the Total Environment, 2018, 644: 781-790.

[4] Gao J B, Du F J, Zuo L Y, et al. Integrating ecosystem services and rocky desertification into identification of karst ecological security pattern[J]. Landscape Ecology, 2020, 36(7): 2113-2133.

[5] Wei Q Q, Halike A, Yao K X, et al. Construction and optimization of ecological security pattern in Ebinur Lake Basin based on MSPA-MCR models[J]. Ecological Indicators, 2022, 138: 108857, doi: 10.1016/j.ecolind.2022.108857.

[6] 朱炳臣, 李同昇, 陈谢扬, 等. 汉江流域生态综合网络构建与生态安全格局识别研究[J]. 长江流域资源与环境, 2024, 33(2): 362-373. [Zhu Bingchen, Li Tongsheng, Chen Xieyang, et al. Research on the construction of ecological integrated network and identification of ecological security pattern in the Han River Basin[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2024, 33(2): 362-373.]

[7] 叶鑫, 邹长新, 刘国华, 等. 生态安全格局研究的主要内容与进展[J]. 生态学报, 2018, 38(10): 3382-3392. [Ye Xin, Zou Changxin, Liu Guohua, et al. Main research contents and advances in the ecological security pattern[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(10): 3382-3392.]

[8] 彭建, 赵会娟, 刘焱序, 等. 区域生态安全格局构建研究进展与展望[J]. 地理研究, 2017, 36(3): 407-419. [Peng Jian, Zhao Huijuan, Liu Yanxu, et al. Research progress and prospect on regional ecological security pattern construction[J]. Geographical Research, 2017, 36(3): 407-419.]

[9] 孙枫, 章锦河, 王培家, 等. 城市生态安全格局构建与评价研究: 以苏州市区为例[J]. 地理研究, 2021, 40(9): 2476-2493. [Sun Feng, Zhang Jinhe, Wang Peijia, et al. Construction and evaluation of urban ecological security pattern: A case study of Suzhou City[J]. Geographical Research, 2021, 40(9): 2476-2493.]

[10] 韩俊宇, 余美瑛. 全域全要素统筹背景下生态安全格局识别与优化建议——以衢州市常山县为例[J]. 地理研究, 2021, 40(4): 1078-1095. [Han Junyu, Yu Meiying. A multi-factor integration identification method of ecological security pattern and optimization suggestions: A case of Changshan County, Quzhou City[J]. Geographical Research, 2021, 40(4): 1078-1095.]

[11] 黄秋淞, 何浩. 耦合生态系统服务和景观连通性的环塔里木盆地绿洲区生态安全格局研究[J]. 干旱区地理, 2024, 47(10): 1745-1754. [Huang Qiusong, He Hao. Ecological security pattern of the oasis area around the Tarim Basin based on coupled ecosystem services and landscape connectivity[J]. Arid Land Geography, 2024, 47(10): 1745-1754.]

[12] 王晓玉, 冯喆, 吴克宁, 等. 基于生态安全格局的山水林田湖草生态保护与修复[J]. 生态学报, 2019, 39(23): 8725-8732. [Wang Xiaoyu, Feng Zhe, Wu Kening, et al. Ecological conservation and restoration of life community theory based on the construction of ecological security pattern[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(23): 8725-8732.]

[13] 李洪庆, 杨瑀, 张俊红. 雅鲁藏布江山南宽谷流域生态安全格局构建[J]. 干旱区地理, 2023, 46(9): 1503-1513. [Li Hongqing, Yang Yu, Zhang Junhong. Construction of ecological security pattern in Shannan Wide Valley Basin of Yarlung Zangbo River[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(9): 1503-1513.]

[14] 王秀明, 赵鹏, 龙颖贤, 等. 基于生态安全格局的粤港澳地区陆域空间生态保护修复重点区域识别[J]. 生态学报, 2022, 42(2): 450-461. [Wang Xiuming, Zhao Peng, Long Yingxian, et al. Identification of key areas of land space ecological protection and restoration based on the pattern of ecological security in Guangdong, Hong Kong and Macau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(2): 450-461.]

[15] 李恒凯, 刘玉婷, 李芹, 等. 基于MCR模型的南方稀土矿区生态安全格局分析[J]. 地理科学, 2020, 40(6): 989-998. [Li Hengkai, Liu Yuting, Li Qin, et al. Analysis of ecological security pattern of southern rare earth mining area based on MCR model[J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(6): 989-998.]

[16] 姚材仪, 何艳梅, 程建兄, 等. 岷江流域生态安全格局评价与优化——基于最小累积阻力模型和重力模型[J]. 生态学报, 2023, 43(17): 7083-7096. [Yao Caiyi, He Yanmei, Cheng Jianxiong, et al. Evaluation of ecological security pattern and optimization suggestions in Minjiang River Basin based on MCR model

and gravity model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(17): 7083-7096.]

[17] 潘竟虎, 王云. 基于CVOR和电路理论的讨赖河流域生态安全评价及生态格局优化[J]. 生态学报, 2021, 41(7): 2582-2595. [Pan Jinghu, Wang Yun. Ecological security evaluation and ecological pattern optimization in Taolai River Basin based on CVOR and circuit theory[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(7): 2582-2595.]

[18] 崔嵩, 杜显磊, 贾朝阳, 等. 黑龙江省生态系统服务价值估算及其生态安全格局构建[J]. 环境科学, 2024, 45(11): 6489-6500. [Cui Song, Du Xianlei, Jia Zhaoyang, et al. Ecosystem service value estimation and ecological security pattern in Heilongjiang Province[J]. Environmental Science, 2024, 45(11): 6489-6500.]

[19] 于婧, 汤昪, 陈艳红, 等. 山水资源型城市景观生态风险评价及生态安全格局构建——以张家界市为例[J]. 生态学报, 2022, 42(4): 1290-1299. [Yu Jing, Tang Bian, Chen Yanhong, et al. Landscape ecological risk assessment and ecological security pattern construction in landscape resource-based city: A case study of Zhangjiajie City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(4): 1290-1299.]

[20] 梁坤宇, 金晓斌, 张晓琳, 等. 耦合生态系统服务供需的生态安全格局构建——以苏南地区为例[J]. 生态学报, 2024, 44(9): 3880-3896. [Liang Kunyu, Jin Xiaobin, Zhang Xiaolin, et al. Construction of eological security patterns coupling supply and demand of ecosystem services: A case study of southern Jiangsu[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(9): 3880-3896.]

[21] Gao J, Gong J, Li Y, et al. Ecological network assessment in dynamic landscapes: Multi-scenario simulation and conservation priority analysis[J]. Land Use Policy, 2024, 139, 107059, doi: 10.1016/j.landusepol.2024.107059.

[22] Zhang J, Chen H, Ma Y H, et al. Identification of priority areas for ecological restoration based on ecological security and landscape elements[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 30(12): 35307-35325.

[23] Liu H L, Wang Z L, Zhang L P, et al. Construction of an ecological security network in the Fenhe River Basin and its temporal and spatial evolution characteristics[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 417: 137961, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.137961.

[24] 倪庆琳, 侯湖平, 丁忠义, 等. 基于生态安全格局识别的国土空间生态修复分区——以徐州市贾汪区为例[J]. 自然资源学报, 2020, 35(1): 204-216. [Ni Qinglin, Hou Huping, Ding Zhongyi, et al. Ecological remediation zoning of territory based on the ecological security pattern recognition: Taking Jiawang District of Xuzhou City as an example[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(1): 204-216.]

[25] Dang H, Lü Y H, Guo J Y, et al. Identifying priority conservation areas in regional ecological networks using attack scenario simulation[J]. Global Ecology and Conservation, 2023, 46: E02602, doi: 10.1016/j.gecco.2023.e02602.

[26] Liu L, Song W, Zhang Y J, et al. Zoning of ecological restoration in the Qilian Mountain area, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(23): 12417, doi: 10.3390/ijerph182312417.

[27] 石金鑫, 梁小英, 李辉蔷, 等. 陕北黄土高原景观格局对生态系统服务权衡关系的影响[J]. 生态学报, 2023, 43(21): 8958-8972. [Shi Jinxin, Liang Xiaoying, Li Huiqiang, et al. Impact of landscape pattern on ecosystem service trade-offs in the Loess Plateau of northern Shaanxi[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(21): 8958-8972.]

[28] Zhao N Z, Liu Y, Cao G F, et al. Forecasting China's GDP at the pixel level using nighttime lights time series and population images[J]. Mapping Sciences & Remote Sensing, 2017, 54(3): 407-425.

[29] Li Y G, Liu W, Feng Q, et al. The role of land use change in affecting ecosystem services and the ecological security pattern of the Hexi Regions, northwest China[J]. Science of the Total Environment, 2022, 855: 158490, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.158940.

[30] Jiang W, Fu B J, Gao G Y, et al. Exploring spatial-temporal driving factors for changes in multiple ecosystem services and their relationships in west Liao River Basin, China[J]. Science of the Total Environment, 2023, 904: 166716, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.166716.

[31] 赵文祯, 韩增林, 闫晓露, 等. 基于生态系统服务多情景权衡的生态安全格局构建——以大连市瓦房店为例[J]. 自然资源学报, 2020, 35(3): 546-562. [Zhao Wenzhen, Han Zenglin, Yan Xiaolu, et al. Ecological security pattern construction based on multi-scenario trade-off of ecosystem services: A case study of Wafangdian, Dalian[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(3): 546-562.]

[32] 潘竟虎, 李磊. 利用OWA和电路模型优化黄河流域甘肃段生态安全格局[J]. 农业工程学报, 2021, 37(3): 259-268. [Pan Jinghu, Li Lei. Optimization of ecological security pattern in Gansu section of the Yellow River Basin using OWA and circuit model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(3): 259-268.]

[33] Qiu H L, Zhang J Y, Han H R, et al. Study on the impact of vegetation change on ecosystem services in the Loess Plateau, China[J]. Ecological Indicators, 2023, 154, 110812, doi: 10.1016/j.ecolind.2023.110812.

[34] 付凤杰, 刘珍环, 刘海. 基于生态安全格局的国土空间生态修复关键区域识别——以贺州市为例[J]. 生态学报, 2021, 41(9): 3406-3414. [Fu Fengjie, Liu Zhenhuan, Liu Hai. Identifying key areas of ecosystem restoration for territorial space based on ecological security pattern: A case study in Hezhou City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(9): 3406-3414.]

[35] 冯琰玮, 甄江红, 田桐羽. 基于生态安全格局的国土空间保护修

复优化——以内蒙古呼包鄂地区为例[J]. 自然资源学报, 2022, 37(11): 2915-2929. [Feng Yanwei, Zhen Jianghong, Tian Tongyu. Optimization of land protection and restoration based on ecological security pattern: A case study of Hohhot-Baotou-Ordos region in Inner Mongolia[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(11): 2915-2929.]

[36] 卫新东, 林良国, 冯小龙, 等. 神木市生态安全格局构建与生态问题定量诊断[J]. 生态学报, 2023, 43(1): 82-94. [Wei Xindong, Lin Liangguo, Feng Xiaolong, et al. Construction of ecological security pattern and quantitative diagnosis of ecological problems in Shenmu City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(1): 82-94.]

[37] 覃彬桂, 林伊琳, 赵俊三, 等. 基于InVEST模型和电路理论的昆明市国土空间生态修复关键区域识别[J]. 中国环境科学, 2023, 43(2): 809-820. [Qin Bingui, Lin Yilin, Zhao Junsan, et al. Identification of key areas for the ecological restoration of territorial space in Kunming based on the InVEST model and circuit theory[J]. China Environmental Science, 2023, 43(2): 809-820.]

[38] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134. [Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134.]

[39] Zhu C M, Zhang X L, Zhou M M, et al. Impacts of urbanization and landscape pattern on habitat quality using OLS and GWR models in Hangzhou, China[J]. Ecological Indicators, 2020, 117: 106654, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106654.

[40] 彭建, 李慧蕾, 刘焱序, 等. 雄安新区生态安全格局识别与优化策略[J]. 地理学报, 2018, 73(4): 701-710. [Peng Jian, Li Huilei, Liu Yanxu, et al. Identification and optimization of ecological security pattern in Xiong'an New Area[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(4): 701-710.]

[41] 李婷, 董玉祥. 基于RSEI和景观功能的珠三角地区1986—2019年生态安全格局演变过程及其影响因子[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2022, 50(4): 69-80. [Li Ting, Dong Yuxiang. Evolution of ecological security pattern and its influencing factors in the Pear River Delta from 1986 to 2019 based on RSEI and landscape function[J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 2022, 50(4): 69-80.]

[42] Jiang H, Peng J, Zhao Y, et al. Zoning for ecosystem restoration based on ecological network in mountainous region[J]. Ecological Indicators, 2022, 142: 109138, doi: 10.1016/j.ecolind.2022.109138.

[43] 李彤, 贾宝全, 刘文瑞, 等. 宜昌市生态安全网络要素时空动态及其影响因素[J]. 生态学报, 2023, 43(15): 6154-6169. [Li Tong, Jia Baoquan, Liu Wenrui, et al. Spatio-temporal dynamics and influencing factors of ecological security network elements in Yichang, Hubei Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(15): 6154-6169.]

[44] Wu D C. Spatially and temporally varying relationships between ecological footprint and influencing factors in China's provinces using geographically weighted regression (GWR) [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 261: 121089, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121089.

[45] 朱炳臣, 李同昇, 朱小青, 等. 基于生态网络优化的生态保护重要性评价——以陕西省为例[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(6): 1480-1493. [Zhu Bingchen, Li Tongsheng, Zhu Xiaoqing, et al. Importance evaluation of ecological conservation based on ecological network optimization: A case study of Shaanxi Province[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2023, 40(6): 1480-1493.]

[46] 杨文越, 叶泓妤. 基于生境质量的粤港澳大湾区生态网络识别[J]. 生态学报, 2023, 43(24): 10430-10442. [Yang Wenyue, Ye Hongyu. Identification of ecological networks in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area based on habitat quality assessment[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(24): 10430-10442.]

[47] 赵菊花, 杨永崇, 王涛, 等. 黄土高原2000—2020年生态网络演变及关键修复区识别[J]. 测绘通报, 2023(8): 19-23, 77. [Zhao Juhua, Yang Yongchong, Wang Tao, et al. Evolution of ecological network and identification of key restoration areas in the Loess Plateau during 2000—2020[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2023(8): 19-23, 77.]

Spatial and temporal evolution and influencing factors of ecological security pattern based on circuit theory: A case of Loess Plateau in northern Shaanxi

ZHANG Jie[1,2], QU Jianjun[1,2], CHEN Hai[1,2], SHI Jinxin[1,2], MA Yuhe[1,2], LIU Di[3]

(1. College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an 710127, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Xi'an 710127, Shaanxi, China; 3. College of Tourism, Henan Normal University, Xinxiang 453007, Henan, China)

Abstract: Identifying landscape elements such as points, lines, and planes that are critical for maintaining regional ecosystems is essential for constructing dynamic ecological security patterns and understanding their influencing factors. Addressing the limitations of previous studies, this research employs morphological spatial pattern analysis (MSPA), landscape connectivity analysis, and circuit theory models to construct ecological security patterns on the Loess Plateau in northern Shaanxi Province, China, from 2000 to 2020. It investigates the temporal and spatial evolution of these patterns and uses geographical detectors, ordinary least squares (OLS), and geographically weighted regression (GWR) models to analyze the spatial heterogeneity of influencing factors, offering ecological restoration strategies. The results showed that: (1) From 2000 to 2020, ecological sources were concentrated in the southern Loess Plateau of northern Shaanxi, with minimal changes in area and stable spatial locations. (2) The mean ecological resistance surface values on the Loess Plateau in northern Shaanxi in 2000, 2010, and 2020 were 4.96, 4.36, and 4.40, respectively, showing a pattern of low resistance in the south region and high resistance in the northwest region. (3) Ecological corridor lengths on the Loess Plateau in northern Shaanxi were 2416.25 km, 3433.61 km, and 2643.62 km in 2000, 2010, and 2020, respectively. Southern regions exhibited dense, low-resistance corridors, while northern regions had sparse, high-resistance corridors. (4) Ecological pinch points and barriers were mainly located in the northwest of the Loess Plateau in northern Shaanxi, with their areas consistently decreasing over time. (5) Vegetation coverage, landscape diversity, population density, slope, and precipitation were the primary factors influencing the spatial heterogeneity of the ecological security pattern. These findings provide a scientific basis for ecological planning on the Loess Plateau in northern Shaanxi, aiding in the development and adjustment of ecological restoration strategies.

Key words: ecological security pattern; temporal and spatial evolution; influencing factors; circuit theory; the Loess Plateau of northern Shaanxi